

---

## 7.3 Suche nach elementaren Bausteinen der Materie

Hinweis: Dieses Kapitel ist praktisch wörtlich aus Hammer-Knauth-Kühnel, Physik 13, Oldenbourg Verlag München, 1998, entnommen.

Im Jahre 1932 hatten die physikalischen Vorstellungen von der Struktur der Materie insofern einen Abschluss erreicht, als es drei durch Experimente nachgewiesene Elementarteilchen gab, und zwar die Elektronen, aus denen die Atomhüllen aufgebaut sind, sowie die Nukleonen Neutronen und Protonen, aus denen die Atomkerne gebildet werden. Hinzu kamen noch Photonen, die Quanten des elektromagnetischen Feldes.

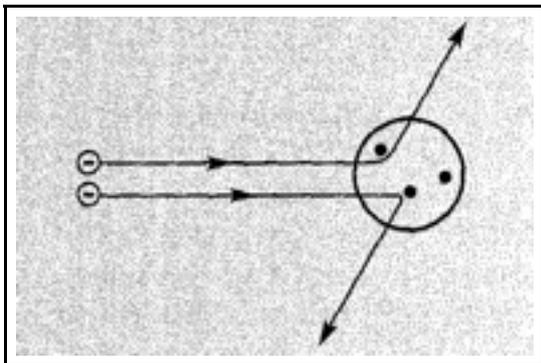
In der Folgezeit wurden über hundert weitere Elementarteilchen entdeckt, z. B. das Positron als Antiteilchen des Elektrons. Zu den meisten Teilchen fand man die Antiteilchen, sodass man annahm, dass es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt.

Die Vielfalt der Teilchen einerseits und die Idee, dass das Geschehen in der Natur durch einfache Gesetze erklärbar sein müsse, ließ die theoretischen Physiker nach einer neuen Substruktur der Materie suchen.

### Quarks und Leptonen als elementare Bausteine der Materie

Rutherford benutzte  $\alpha$ -Strahlen und konnte in das Innere der Atome „hineinschauen“. Mit seinen berühmten Streuexperimenten entdeckte er die Substruktur des Atoms, den Atomkern.

Zur Untersuchung der inneren Struktur des Protons verwendete man energiereiche Elektronen. Ab 1966 konnte man mit einem Linearbeschleuniger in Stanford (USA) Elektronen auf Energien von etwa 20 GeV beschleunigen. Diese hochenergetischen Elektronen wurden auf Materie geschossen. Man erwartete, dass die Elektronen in das Innere des Atomkerns eindringen und entsprechend der inneren Struktur des Nukleons abgelenkt werden.



Die Experimente ergaben, dass die elektrische Ladung innerhalb des Protons in wenigen Punkten konzentriert ist. Man fand, dass die Elektronen sehr oft unter großen Winkeln gestreut werden, so als ob sie punktförmigen Ladungen begegnen..

Richard Feynman (amerik. Physiker, 1918 - 1988, NP 1965) deutete 1969 die Experimente von Stanford, indem er annahm, dass das Proton aus noch viel kleineren Teilchen aufgebaut sein muss. Aus den Experimenten konnte man schließlich sogar die Ladungen dieser Teilchen ermitteln: man erhielt  $+\frac{2}{3}e$  und  $-\frac{1}{3}e$ , also Bruchteile der Elementarladung.

Dies ermöglichte es, diese Teilchen als Quarks zu identifizieren, die Murray Gell-Mann (amerik. Physiker, geb. 1929, NP 1969) bereits im Jahr 1964 als elementare Bausteine der Materie postuliert hatte. (Der Name „Quarks“ stammt von einem Ausdruck in dem Roman „Finnegans Wake“ des irischen Schriftstellers James Joyce.) Nach seiner Theorie musste es drei Quarks geben, denen er die Namen up (u), down (d) und strange (s) gab.

Inzwischen weiß man, dass es noch weitere 3 Quarks gibt; diese erhielten die Namen charm (c), top (t) und bottom (b). (Das t-Quark konnte als letztes der 6 Quarks erst im Jahr 1994 am Fermilab bei Chicago (USA) experimentell nachgewiesen werden.) Die uns umgebende Materie ist jedoch nur aus zwei der insgesamt 6 Quarks aufgebaut. So besteht das Proton aus zwei u- und einem d-Quark, das Neutron aus einem u- und zwei d-Quarks (B4).

### **Elementare Bausteine der Materie**

Nachdem das Proton lange Zeit als elementarer Baustein der Materie gegolten hatte, die Streuexperimente von Stanford jedoch zeigten, dass das Proton aus Quarks aufgebaut ist, stellt sich die Frage, ob nicht auch die Quarks eine Substruktur besitzen, also aus noch kleineren Bausteinen zusammengesetzt sind. Diese Frage konnte von den Physikern bis heute nicht beantwortet werden, da die Energie der Teilchen in den modernsten Beschleunigern noch nicht ausreicht, um in die Quarks „hineinschauen“ zu können. Sie gelten deshalb bis heute als elementare Bausteine der Materie.

Es gibt noch andere elementare Bausteine, bei denen die Physiker bisher keine Substruktur feststellen konnten. Dazu zählt z. B. das Elektron und das Neutrino. Elektronen und Neutrinos werden auch als Leptonen bezeichnet, da ihre Masse relativ klein ist. Später wurden jedoch noch andere Leptonen mit größerer Masse entdeckt (s. a. 22.2.2). Diese erhielten die Namen Myon, Myon-Neutrino, Tau und Tau-Neutrino. Man hat festgestellt, dass nicht nur das Elektron ein Antiteilchen, das Positron, besitzt, sondern dass es zu jedem elementaren Baustein der Materie ein Antiteilchen gibt; dieses hat jeweils die gleiche Ruhemasse, aber entgegengesetzte Ladung.

Die heute bekannten elementaren Bausteine lassen sich in 3 Generationen einordnen; einen Überblick über diese Urbausteine gibt die Tabelle:

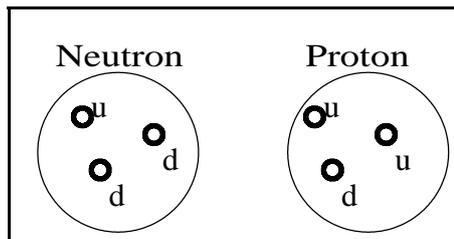
## elementare Bausteine der Materie

Quarks		Leptonen	
1. Generation			
up-Quark	u	Elektron	$e^-$
down-Quark	d	Elektron-Neutrino	$\nu_e$
Anti-up-Quark	$\bar{u}$	Positron	$e^+$
Anti-down-Quark	$\bar{d}$	Elektron-Antineutrino	$\bar{\nu}_e$
2. Generation			
charm-Quark	c	Myon	$\mu^-$
strange-Quark	s	Myon-Neutrino	$\nu_\mu$
Anti-charm-Quark	$\bar{c}$	Antimyon	$\mu^+$
Anti-strange-Quark	$\bar{s}$	Myon-Antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$
3. Generation			
top-Quark	t	Tau	$\tau^-$
bottom-Quark	b	Tau-Neutrino	$\nu_\tau$
Anti-top-Quark	$\bar{t}$	Antitau	$\tau^+$
Anti-bottom-Quark	$\bar{b}$	Tau-Antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$

Zusammenfassung: Urbausteine der Materie sind Quarks und Leptonen.

### Anmerkungen:

1. Das Wort Leptonen kommt aus dem Griechischen ( $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\varsigma$  (griech.) zart, leicht)
2. Proton und Neutron setzen sich folgendermaßen aus  $u$ - und  $d$ -Quarks zusammen:
  - a) Neutron, zusammengesetzt aus den drei Quarks  $u$ ,  $d$  und  $d$
  - b) Proton, zusammengesetzt aus den drei Quarks  $u$ ,  $u$  und  $d$



### Grundlegende Eigenschaften der Urbausteine: Elektrische Ladung der Urbausteine

Schon die Streuexperimente von Stanford bestätigten für das  $u$ - und das  $d$ -Quark die Theorie Gell-Manns, wonach die elektrische Ladung der Quarks jeweils ein Bruchteil der Elementarladung ist. In der Tabelle, in der die Urteilchen nach ihrer Ladung geordnet sind, erkennt man, dass nur die Ladung der Leptonen ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung ist.

Zunächst könnte man meinen, dass die Drittelladungen der Tatsache widersprechen, wonach in der Natur nur Teilchen beobachtet werden, die ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung tragen.

Tatsächlich kann man auch keine einzelnen Quarks erzeugen. Sie treten vielmehr nur in solchen Verbindungen auf, bei denen sich als Summe aller Quarkladungen ein Vielfaches der Elementarladung ergibt. So gibt es Verbindungen aus drei Quarks, die man Baryonen ( $\beta\alpha\rho\nu\sigma =$  schwer) nennt, aber auch solche aus zwei Quarks; diese heißen Mesonen ( $\mu\epsilon\sigma\sigma =$  das Mittlere). Baryonen und Mesonen werden als Hadronen ( $\alpha\delta\rho\sigma =$  stark) bezeichnet.

Zu den Baryonen gehört das Proton und das Neutron. Für ihre Ladung ergibt sich aus den Ladungen der Quarks:

Proton	uud	$Q_p = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$
Neutron	udd	$Q_n = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$

Untersucht man alle Zweierverbindungen von Quarks, so erhält man nur dann ganzzahlige Vielfache der Elementarladung, wenn man ein Quark mit einem Antiquark kombiniert. Mesonen bestehen also immer aus einer Verbindung eines Quarks mit einem Antiquark. So wird z. B. die Verbindung  $d\bar{u}$  als Pion ( $\pi$ ) bezeichnet. Die Existenz von Pionen und vielen anderen Mesonen konnte im Experiment bestätigt werden.

Übersicht über die Ladungen der Elementarteilchen:

Generation			elektr. Ladung
1	2	3	
$e^+$	$\mu^+$	$\tau^+$	+1
u	c	t	$+\frac{2}{3}$
$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$	$+\frac{1}{3}$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	0
d	s	b	$-\frac{1}{3}$
$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$	$-\frac{1}{3}$
$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	-1

Zusammenfassung: Quarks kommen in der Natur nur in solchen Kombinationen vor, bei denen sich ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung ergibt.

Verbindungen aus drei Quarks heißen Baryonen, solche aus zwei Quarks Mesonen.

### Ruhemasse der Urbausteine

Während sich die Ruhemassen der elektrisch geladenen Leptonen (Elektron, Myon, Tau) sehr genau messen lassen, ist dies für die Neutrinos, die nahezu keine Wechselwirkung mit Materie zeigen, nicht der Fall. Für die Ruhemasse der Neutrinos kann man bis jetzt nur Obergrenzen angeben. Man weiß auch noch nicht sicher, ob die Neutrinos überhaupt eine Ruhemasse besitzen.

Auch die direkte Messung der Quarkmassen ist nicht möglich, da die Quarks nie einzeln, sondern immer in Verbindungen in der Natur vorkommen. Deshalb kann man für die Ruhemassen der Quarks auch nur ungefähre Werte angeben.

Die Tabelle gibt einen Überblick über die Ruheenergien der Urbausteine.

Urbaustein	Ruheenergie	Urbaustein	Ruheenergie
u-Quark	$\approx 0,4 \text{ GeV}$	Elektron	0,511 MeV
d-Quark	$\approx 0,7 \text{ GeV}$	Elektron-Neutrino	$< 16 \text{ eV}$
c-Quark	$\approx 1,5 \text{ GeV}$	Myon	106 MeV
s-Quark	$\approx 0,15 \text{ GeV}$	Myon-Neutrino	$< 300 \text{ keV}$
t-Quark	$\approx 174 \text{ GeV}$	Tau	1,78 GeV
b-Quark	$\approx 4,7 \text{ GeV}$	Tau-Neutrino	$< 40 \text{ MeV}$

### Fundamentale Naturkräfte

Die Urbausteine, die wir von der elektromagnetischen Kraft her kennen, dass diese nur dann zwischen zwei Teilchen wirkt, wenn sie eine elektrische Ladung tragen, hat man auch auf die anderen Kräfte übertragen. So ist die "Ladung" der Gravitationskraft nichts anderes als die Masse.

Bei der starken Kraft sprechen die Physiker von einer Farbladung. Hier gibt es sogar drei verschiedene Farbladungen, die mit rot, blau und grün bezeichnet werden, die aber nichts mit wirklichen Farben zu tun haben.

Auch die schwache Kraft wirkt zwischen Ladungen, die man als schwache Ladungen bezeichnet.

Das Zustandekommen der einzelnen Kräfte wird in der jeweiligen Theorie durch den permanenten Austausch von Bindeteilchen beschrieben. Diese sind für die elektromagnetische Kraft virtuelle Photonen, für die schwache Kraft sind es drei Vektorbosonen, die mit  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  bezeichnet werden. Die starke Kraft wird durch acht Gluonen, die Gravitationskraft durch Gravitonen vermittelt. Ob Gravitonen wirklich existieren, konnte allerdings noch nicht nachgewiesen werden.

Die Tabelle gibt einen Überblick über die fundamentalen Kräfte und deren Bindeteilchen.

Kraft	Reichweite	Ladung	Bindeteilchen
-------	------------	--------	---------------

## elementare Bausteine der Materie

Gravitationskraft	unendlich	Masse	Graviton
elektromagnetische Kraft	unendlich	elektrische Ladung	Photon
schwache Kraft	$< 10^{-18}$ m	schwache Ladung	schwache Vektorbosonen
starke Kraft	$< 10^{-15}$ m	Farbladung	Gluonen

Einige Eigenschaften der Bindeteilchen zeigt die folgende Tabelle:

Bindeteilchen	Ruheenergie in GeV	elektrische Ladung	Bemerkungen
Graviton	0	0	vermutet
Photon	0	0	experimentell nachgewiesen
schwache Vektorbosonen			
W <sup>+</sup>	81	+1	experimentell nachgewiesen
W <sup>-</sup>	81	-1	
Z <sup>0</sup>	91	0	
Gluonen	0	0	permanent eingeschlossen

### Standardmodell

Die Vorstellung der Physiker, dass alle Materie aus den Urbausteinen Quarks und Leptonen aufgebaut ist und dass diese Urbausteine durch den Austausch von Bindeteilchen über vier fundamentale Naturkräfte miteinander wechselwirken, bezeichnet man als das Standardmodell der Teilchenphysik. Es enthält eine Theorie, die die starke Kraft durch Farbladungen und den Austausch von Gluonen beschreibt. Diese Theorie bezeichnet man als Quantenchromodynamik ( $\chi\rho\omega\mu\alpha = \text{Farbe}$ ). In den Siebziger- und Achtzigerjahren des 20. Jahrhunderts ist es den Physikern gelungen, die Theorie der elektromagnetischen Kraft, die Quantenelektrodynamik, mit der Theorie der schwachen Kraft zu einer einzigen fundamentalen Theorie zu verschmelzen; diese bezeichnet man als Theorie der elektroschwachen Kraft. Das Standardmodell mit der Quantenchromodynamik und der Theorie der elektroschwachen Kraft hat sich bis heute hervorragend bewährt; es ist kein Experiment bekannt, das mit dem Standardmodell im Widerspruch steht.

### Suche nach einer vereinheitlichenden Beschreibung der Naturkräfte

Nach dem großen Erfolg der Verschmelzung der Quantenelektrodynamik mit der Theorie der schwachen Kraft zu einer einheitlichen Theorie versuchen die Physiker die Theorie der elektroschwachen Kraft mit der Quantenchromodynamik zu einer großen vereinheitlichten Theorie zu verschmelzen.

Später soll diese Theorie dann noch mit der Theorie der Gravitation zu einer Einheit zusammengefasst werden.

Die Physiker vermuten, dass diese Urkraft kurz nach dem Urknall, aus dem unser Universum entstanden ist, auch tatsächlich existiert hat und dass sich nach kurzer Zeit die uns heute bekannten vier Naturkräfte abgespalten haben. Um der Natur dieser Urkraft auf die Spur zu kommen, versuchen die Physiker durch den Bau von immer größeren Beschleunigeranlagen im Labor für kurze Zeit Bedingungen herzustellen, wie sie kurz nach dem Urknall bestanden haben. Aber selbst mit dem Large Hadron Collider (LHC), der 2008 am CERN bei Genf (CERN, Abkürzung für Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire) in Betrieb gehen soll und mit dem man Energien bis zu 90 GeV erreichen will, sind die Physiker noch weit davon entfernt, Bedingungen wie beim Urknall zu erzeugen. Trotzdem gibt es schon einige Ansätze für eine große vereinheitlichte Theorie. Eine ist die SU(5)-Theorie. Die Bezeichnung SU(5) bezieht sich auf die mathematische Symmetriegruppe, die der Theorie zugrunde liegt.

Unter normalen Bedingungen verhalten sich die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft ganz verschieden; gemäß der SU(5)-Theorie werden sie ununterscheidbar, wenn Teilchen mit Energien der Größenordnung  $10^{15}$  GeV wechselwirken.

Die wichtigste Konsequenz der SU(5)-Theorie besteht darin, dass sich Quarks in Leptonen verwandeln können. Die Folge ist, dass das Proton in leichtere Teilchen zerfallen könnte, etwa in ein Positron und ein neutrales Pion. Ein Pion ist ein Meson, das aus zwei Quarks besteht. Jedoch ist für den Protonenzerfall eine Halbwertszeit von  $10^{30}$  Jahren zu erwarten.

Ein glücklicher Zufall will es, dass der nach der SU(5)-Theorie bevorzugte Zerfall ein charakteristisches Zeichen hinterlässt. Das Positron und das neutrale Pion haben beide eine relativ hohe Energie von etwa 0,5 GeV und fliegen in entgegengesetzte Richtungen auseinander. Solche Ereignisse, bei denen hochenergetische Zerfallsprodukte mit entgegengesetzten Bewegungsrichtungen entstehen, sind bei anderen Zerfällen als dem Protonenzerfall sehr unwahrscheinlich. Daher sollten Zerfallsereignisse mit einem Positron und einem Pion einfacher zu identifizieren sein als viele andere Zerfälle.

Doch selbst dann, wenn man weiß, wonach Ausschau zu halten ist, sind die Vorhersagen der SU(5)-Theorie äußerst schwierig zu testen. Eine Halbwertszeit von  $10^{30}$  Jahren entspricht dem Zerfall von ungefähr einem Proton pro Tag in 1000 Tonnen Materie. Und dieser Zerfall muss vor einem Hintergrund vieler Teilchen erkannt werden, die von außen eindringen. Als Hintergrundquellen kommen die Strahlung der natürlichen Radioaktivität und die kosmische Strahlung infrage.

Man verlegt den Beobachtungsort tief unter die Erdoberfläche und kann dadurch einen Großteil der Hintergrundstrahlung abschirmen. Die Neutrinostrahlung kann grundsätzlich nicht abgeschirmt werden. Eine Unterscheidung der beiden Zerfallsarten von Neutrino und Protonen wird ermöglicht durch die Winkelverteilung der bei den verschiedenen Ereignissen erzeugten Produkte.

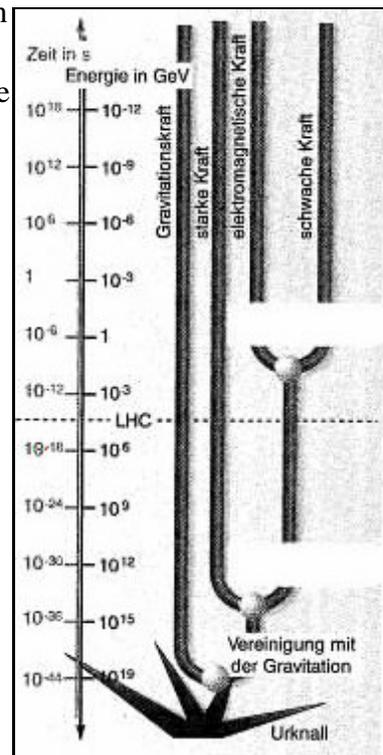
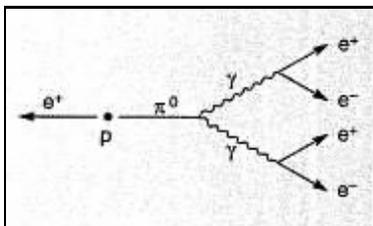
Wenn ein Neutrino mit einem Teilchen zusammenstößt, bewegen sich die Reaktionsprodukte durch den Impuls des Neutrinos in Vorwärtsrichtung. Zerfällt dagegen ein ruhendes Proton, so bewegen sich die emittierten Teilchen in entgegengesetzte Richtungen, so dass ihr Gesamtimpuls Null ist.

Der mögliche Protonenzerfall wird derzeit in mehreren Ländern untersucht, bisher jedoch ohne Ergebnis.

Graphische Anmerkungen:

a) Abspaltung der vier Naturkräfte aus einer Urkraft kurz nach dem Urknall. Auch mit dem derzeit in Bau befindlichen Large Hadron Collider (LHC) sind die Physiker noch weit davon entfernt, eine große vereinheitlichte Theorie experimentell überprüfen zu können.

b) Zerfall eines Protons ( $p$ ) in ein Positron ( $e^+$ ) und ein Pion ( $\pi^0$ ), eine Vorhersage der SU(5)-Theorie. Das Pion entmaterialisiert in zwei  $\gamma$ -Quanten, die Paarbildungen erzeugen.



This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.de>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.